DOI:10.11931/guihaia.gxzw201807021

贵州喀斯特山区典型人工林土壤矿质元素特征[1]

喻阳华[1*]，程　雯[1]，杨丹丽[2]

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心，贵阳 550001；

2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院，贵阳 550025)

摘要：阐明群落水平上的土壤矿质元素特征，对揭示植物的产量、品质形成机制和养分计量平衡规律具有重要意义，能够科学指导人工林可持续经营。本研究以贵州喀斯特山区典型人工林为研究对象，以金属元素和非金属元素进行类型划分，探讨了土壤矿质元素含量特征及其相关性。结果表明：该区典型人工林土壤矿质元素含量存在较大差异，且同一元素在不同树种之间的变化幅度各异，锌、铬、铁、钛、铝、镁、镍、钴等的变化规律较为一致，钙、锶等的变化趋势较为相似，砷、硒、硅在桉树（*Eucalyptus robusta*）林、柏木（*Cupressus funebris*）林和枇杷（*Eriobotrya japonica*）林中的含量较高，硫、钠、氯等元素含量则相反；不同矿质元素随林分类型的变化规律不完全一致，表明植物根系对养分的提取和富集能力存在差异；矿质元素之间表现出一定程度的相关性，存在此消彼长的关系，不同矿质元素之间的相关关系各异，表现出增强或抑制效应，尤其以铁、钙等元素与其他元素的关系更为密切；矿质元素之间的互作效应及其计量平衡关系是分析元素特征的关键，是未来值得深入研究的科学问题。研究结果有利于掌握养分元素积累特征与调控规律，对于该区域典型人工林土壤养分管理具有较强的理论和实践意义。

关键词：人工林，土壤，矿质元素，相关性，贵州喀斯特山区

中图分类号： S727/728　　　　**文献标识码：** A

Features of soil mineral elements in man-made forest of Guizhou karst mountain area

YU Yanghua[1*], CHENG Wen[1], YANG Danli[2]

(1. *School of Karst Science / State Engineering Technology Institute for Karst Decertification Control, Guizhou Normal University*, Guiyang 550001，China; 2. *School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University*, Guiyang 550025，China)

Abstract: Mineral element is an important aspect of soil quality, it plays a significant role in plants growth, physiology and ecological functions, and mineral element deficiency is a major cause for the decrease of plant fruit quality. The paper illustrates that soil mineral element feature of community level is significant in yield of plant, quality formation mechanism and nutrient measurement balance rule. It can guide sustainable operation of plantations scientifically. With the typical man-made forest in Guizhou karst mountain area as object and classification of metallic element and non-metallic element, the content features of mineral elements and the correlations were discussed. The result indicated that there were large differences in the soil mineral element contents of the typical man-made forest in the area, meanwhile the elements had different ranges in the different tree species. The change rules of Zn, Cr, Fe, Ti, Al, Mg, Ni, Co were relatively consistent, Ca and Sr's were relatively similar. The content of As, Se, Si were high in *Eucalyptus robusta* forest, *Cupressus funebris* forest and *Eriobotrya japonica* forest, while the contents of S, Na, Cl were just the opposite. The change rule of different mineral elements was not in conformity with different forest types, which indicated that the extraction and accumulation ability of plant root system existed differences. There was a degree of relativity among mineral

基金项目：国家重点研发计划课题(2016YFC0502603)[Supported by the National Key R & D Program of China (2016YFC0502603)]。

作者简介：喻阳华（1984-），男，贵州仁怀人，博士，副教授，主要从事喀斯特环境保护与治理研究，(E-mail) yuyanghua2003@163.com。

elements, the correlativity of different mineral elements differed and represented enhancement inhibitory effect, and especially Fe and Ca have close relationship with other elements. The interaction effect and measure equilibrium relationship of mineral elements was the key to analyze the features of element compositions and a scientific problem deserved to be further studied. The research results were in favor of mastering nutrient element accumulation features and regulation, which had an important theory and practice significance to soil nutrient management of typical plantation in the area. In the future, we should not only pay attention to the pollution caused by mineral element overabundance, but also evaluate the deficiency effect caused by mineral element shortage. Thus, the value of economic forest can improve by releasing adequate and balance supply of nutrients.

Key Words: man-made forest, soil, mineral element, correlation, Guizhou karst mountain area

矿质元素是影响土壤质量的主要因子之一（Joimel et al, 2016），在植物生长、生理、生化过程中发挥着重要作用，与植物产量、品质和风味物质的形成密切相关（Qin et al, 2017），是土壤质量与健康程度的重要决定指标。矿质元素的供应失衡对植物的生长和群落组成产生一系列影响，而植物体内元素的失衡与系统元素限制的平衡被打破有关（毛庆功等，2015），如氮素输入过量会诱发植物体内元素失衡，导致光合氮利用效率下降，生长放缓甚至树木寿命下降（Aber et al, 1995; Whytemare et al, 1997）。他人研究结果表明，矿质元素对花生生长表现出协同效应，不同元素之间表现出互作效应（王丽香等，2013），说明矿质元素对花生的生长、生理状况产生显著影响；施用硅肥促进了大葱生长和对其他矿质元素的吸收（李炜蔷等，2016），表明矿质元素之间还表现出较强的协同效应；矿质元素与油茶生长发育、产量、品质形成与风味都有直接相关关系，是重要的决定性因素（曹永庆等，2015）；适宜的磷、钾、镁、铝、锌含量能够促进茶树形成优质茶叶（任明强等，2010）；合理调节铜、锌、铁等元素的施肥配比，能够改善库尔勒香梨品质（位杰等，2018）。因此，系统研究土壤矿质元素含量特征，对于揭示植物生理、生态特征和产量、品质的形成机理具有重要意义，能够科学指导植物群落健康、可持续经营。

关于植被土壤质量特征的研究，目前主要集中在碳、氮、磷、钾等大量元素（张璐等，2014；黄钰辉等，2017），以及生物学特性（Govaerts et al, 2006；刘丽等，2013），对中量、微量元素的研究报道较为鲜见（王飞等，2015；邓绍欢等，2016），而中量、微量元素在调控植物生长发育及其产量、品质方面具有不可替代的作用，因而忽视对中量、微量矿质元素的研究不利于集成品质维持与提升的技术体系。上述分析表明，阐明典型人工林的土壤矿质元素特征，对于科学管理土壤养分具有较强的理论和实践意义，能够为土地深度开发利用及土地整理耕地培肥提供依据。基于此，本文以贵州喀斯特山区典型人工林为对象，采用环境矿物学的研究方法，探讨土壤中量、微量等矿质元素特征及其变化规律，揭示不同元素之间的相关性。通过上述科学问题的阐释，可以了解养分元素积累特征与调控规律，以期为人工林的生态恢复管理提供基础资料，建立科学培肥制度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于安顺市关岭县花江镇峡谷村与黔西南州贞丰县北盘江镇查耳岩村交界一带（105°38′48.48″ E，25°39′35.64″ N），生境具有明显的独特性。主要表现为：（1）干热气候，气候类型主要为亚热带湿润季风气候，年均降雨量 1 100 mm，季节分配不均匀，冬春旱及伏旱严重，年均温为 18.4 ℃，年均极端最高温为 32.4 ℃，年均极端最低温为 6.6 ℃，年总积温达 6 542.9 ℃，冬春温暖干旱、夏秋湿热，热量资源丰富。（2）河谷地形，区域内河谷深切，地下水深埋，海拔高度 370～1 473 m，垂直高差约 1 100 m，具有典型的河谷气候特征。（3）石漠化发育。属北盘江流域，森林覆盖率不足 30%，基岩裸露率在 50%～80%之间，碳酸盐岩类岩石占 78.45%，土壤以石灰岩为成土母质的石灰土为主，地表破碎，多

处于中度、重度石漠化等级。经过“九五”至“十三五”期间的综合治理，石漠化得到有效控制，生态环境得以明显改善。

1.2 研究方法

选取桉树（*Eucalyptus robusta*）林、柏木（*Cupressus funebris*）林、枇杷（*Eriobotrya japonica*）林、香椿（*Toona sinensis*）林、核桃（*Juglans regia*）林、栾树（*Koelreuteria paniculata*）林6种典型人工林（基本概况见表1），每一人工林设置3个10 m×10 m的样地，每一个样地采用S形土壤样品采集的方法挖取5个土壤剖面，采集0～20 cm的土壤（不足20 cm的以实际深度为准）。样品充分混合后，按照四分法取出1 kg左右样品，剔除石砾和动植物残体，带回实验室用于元素分析。

表1　典型人工林的基本特征

Table 1 Basic characteristics of man-made forests

群落类型 Community types	位置 Position	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	密度 Density（$plant \cdot hm^{-2}$）	年龄 Age (year)	平均树高 Height (m)	盖度 Coverage (%)
桉树林 *ASS. Eucalyptus robusta*	25°42′15″N 105°37′12″E	1157	26	450	26	14	95
柏木林 *ASS. Cupressus funebris*	25°42′16″N 105°37′13″E	1159	28	600	26	12	95
枇杷林 *ASS. Eriobotrya japonica*	25°41′32″N 105°37′58″E	840	18	800	16	6	80
香椿林 *ASS. Toona sinensis*	25°41′46″N 105°36′40″E	661	10	400	28	16	85
核桃林 *ASS. Juglans regia*	25°39′30″N 105°38′34″E	721	15	350	26	18	85
栾树林 *ASS. Koelreuteria paniculata*	25°39′22″N 105°38′18″E	839	10	300	16	16	80

土壤硼（B）、砷（As）、硒（Se）按照《区域地球化学勘查规范》（DZ/T0167-2006）进行测定，硅（Si）、钙（Ca）、镁（Mg）、钠（Na）、铝（Al）、铁（Fe）、铜（Cu）、锌（Zn）、铅（Pb）、铬（Cr）、镉（Cd）、钛（Ti）、镍（Ni）、钴（Co）、锶（Sr）、钼（Mo）、氯（Cl）、硫（S）依据《多目标区域地球化学调查规范（1:250000）》（DZ/T0258-2014）进行测定。

1.3 数据处理

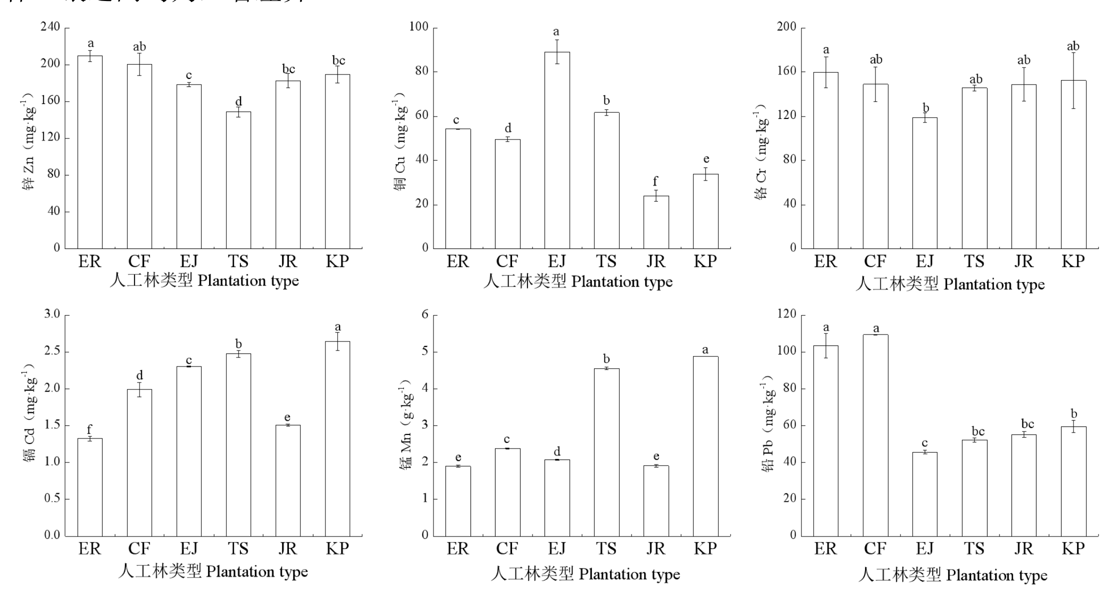
试验数据采用Microsoft Excel 2010进行预处理、计算与整理，使用Origin8.6作图，使用SPSS21.0进行统计分析；采用单因素方差分析（One-way ANOVA）检验土壤矿质元素指标在不同人工林之间的差异性；运用Pearson相关系数法检验土壤矿质元素之间的相关性。显著性水平均设定为P=0.05，极显著性水平均设定为P=0.01。

2 结果与分析

2.1 金属元素

2.1.1 重金属元素　由图1可见，不同人工林土壤的重金属元素含量存在较大差异，同一元素在不同林分之间的变化幅度也存在较大区别。铜的含量为24.01～89.13 $mg \cdot kg^{-1}$，以核桃林土壤最低、枇杷林土壤最高；锌为148.69～209.53 $mg \cdot kg^{-1}$，以香椿林土壤最低、桉树林土壤最高；铅的浓度以柏木林土壤最高（109.40 $mg \cdot kg^{-1}$）、枇杷林土壤最低（45.67 $mg \cdot kg^{-1}$）；铬的含量变幅较窄，不同人工林土壤类型之间的差异显著性较小；镉的浓度为1.33～2.65

mg·kg^{-1}，桉树林土壤最低、栾树林土壤最高；锰除桉树林土壤和核桃林土壤外，其余人工林土壤之间均为显著差异。



注：**ER**. 桉树林；**CF.** 柏木林；**EJ.** 枇杷林；**TS.** 香椿林；**JR**. 核桃林；**KP**. 栾树林。下同。

Note: **ER.** *ASS. Eucalyptus robusta*; **CF.** *ASS. Cupressus funebris;* **EJ.** *ASS. Eriobotrya japonica*; **TS.** *ASS. Toona sinensis*; **JR.** *ASS. Juglans regia*; **KP.** *ASS. Koelreuteria paniculata*. Different lowercase letters on the columns indicate significant differences between different land use patterns（P<0.05）. The same below.

图 1 人工林土壤重金属元素含量

Fig.1 Content of heavy metal elements in soil of man-made forests

2.1.2 非重金属元素 典型人工林土壤非重金属元素（钙、镁、铝、铁、钛、镍、钴、锶、钼）的含量见图 2，由图可知同一元素在不同林地土壤之间表现出较大的差异。总体来看，铁、钛、镁、铝、镍、钴的变化规律较为一致，钙、锶的变化趋势较为相似，结果表明矿质元素在不同人工林土壤中有趋同的变化规律。

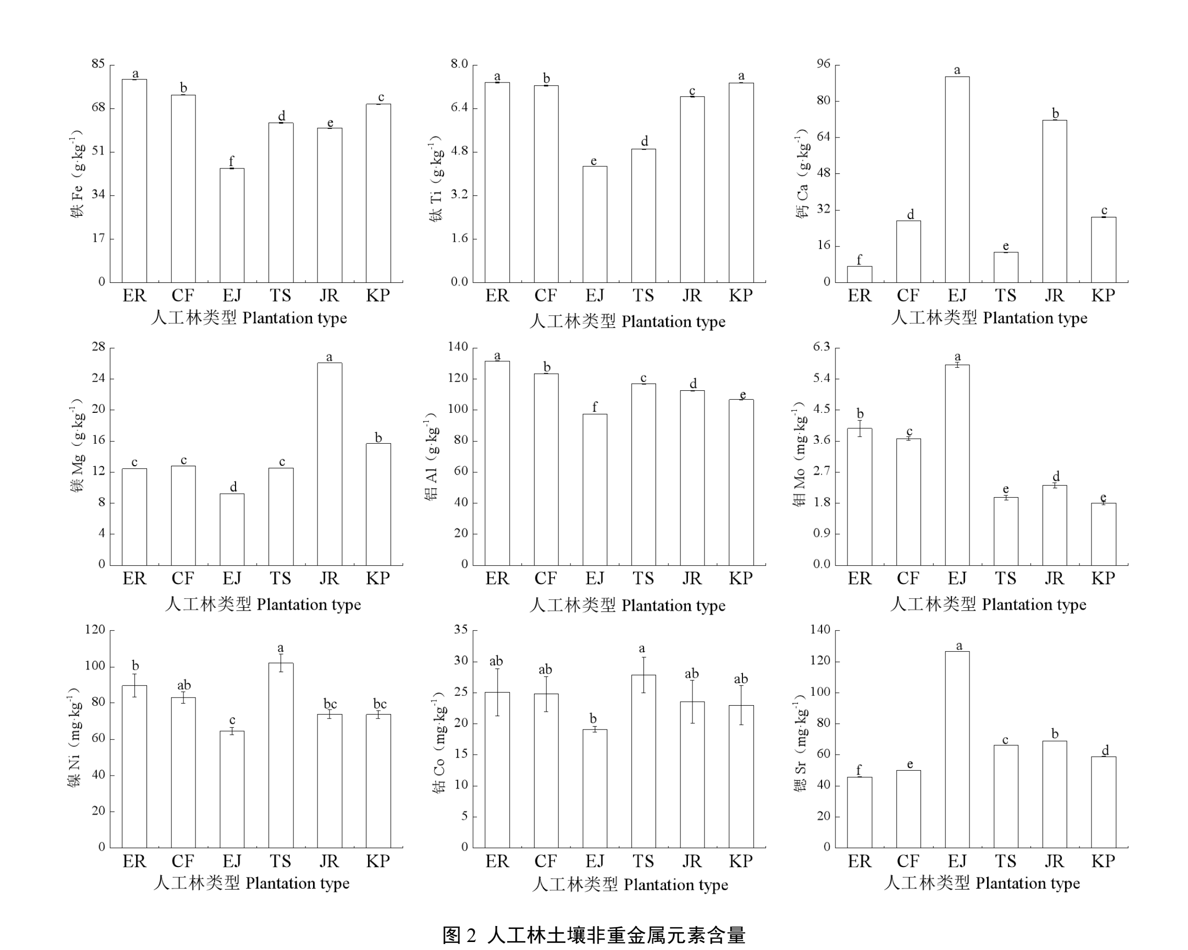


图 2 人工林土壤非重金属元素含量

Fig.2 Content of non heavy metal elements in soil of man-made forests

2.2 非金属元素

本研究测定的非金属元素与半金属元素有钠、硒、硼、砷、硅、氯、硫（本文将半金属元素计入非金属元素）。由图 3 可见，砷、硒、硅在桉树林、柏木林和枇杷林中的含量较高，硫、钠、氯等元素的含量则相反；硼在枇杷林、核桃林和栾树林中的含量更高。不同人工林的非金属元素含量存在显著差异，表征了不同林分的根系对养分的提取和富集能力。

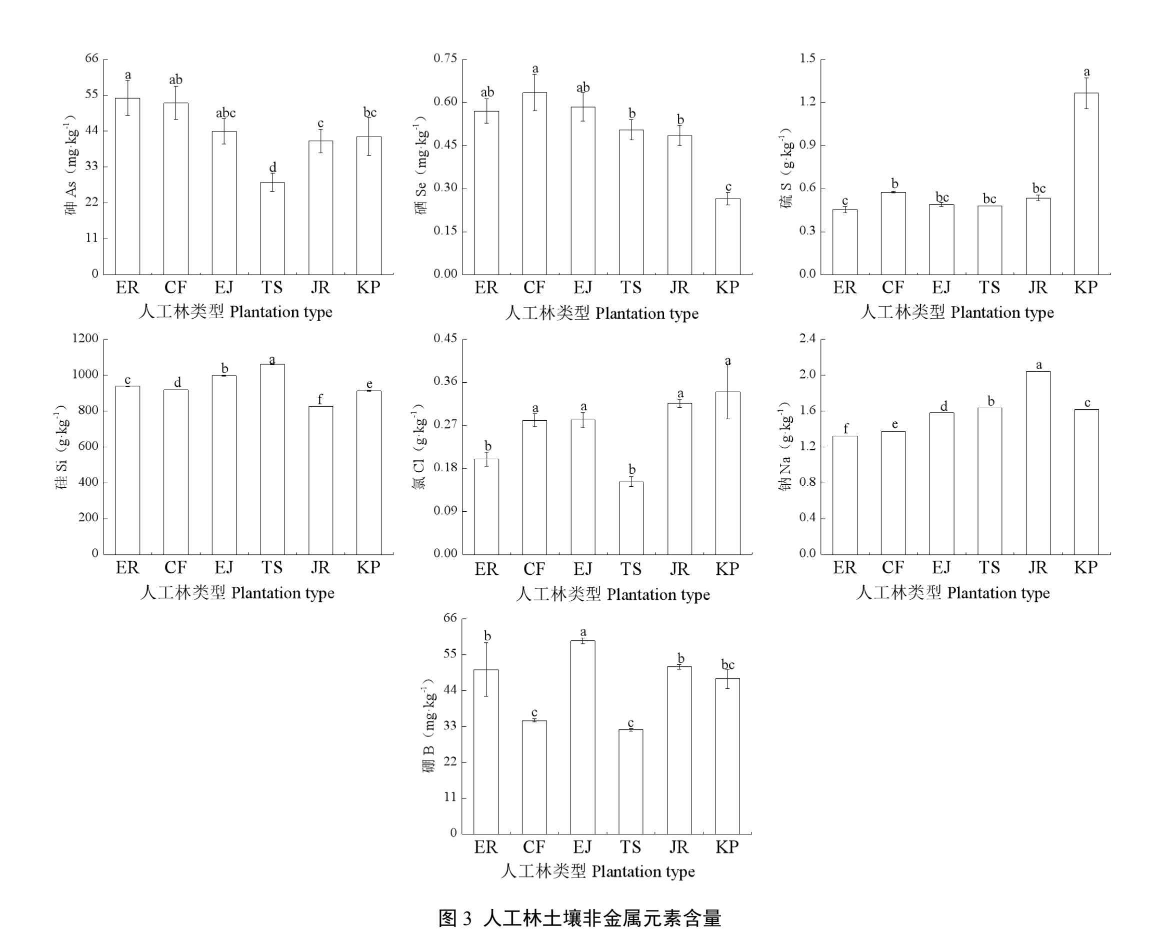


图 3 人工林土壤非金属元素含量

Fig.3 Content of non metallic elements in soil of man-made forests

2.3 元素的相关性分析

由表 2 可见，矿质元素之间表现出一定程度的相关性，不同矿质元素间的相关关系各异。铁与铬、铅、钛、铝呈极显著正相关（*P*<0.01，下同），与钙、锶呈极显著负相关；锰与镉为极显著正相关，与硫为显著正相关（*P*<0.05，下同），且对钼、砷、硒存在抑制效应；钛与锌达极显著正相关，与铝、铬、铅呈显著正相关关系，与锶、铜、硅达极显著负相关，且相关系数均大于 0.700；钙与铝、镍、钴、铬均表现为负相关关系，其中与铝、镍达极显著负相关，与钴、铬呈显著负相关关系，同时与硼呈显著正相关关系，与锶达极显著正相关；镁与钙、硅表现为极显著负相关关系，与钠表现为极显著正相关；铝与镍、铬、铅均呈正相关关系，其中，与锶、铬呈极显著正相关，与铅呈极显著正相关，且相关系数较大，为 0.829；钼对锶、铜、硒均存在增强效应，且对铜的增强效应最大；镍仅与钴达极显著正相关关系，与锶、硼、氯均呈显著负相关关系；钴与铬达极显著正相关关系，与锶呈显著负相关关系；锶对铬、铅存在抑制效应，对铜存在增强效应；铜与铬表现出显著负相关关系，与硅呈极显著正相关；锌对铅、砷均存在增强效应，且对砷增强效应较大；硒与硫达极显著负相关；硅对氯表现为抑制效应。

表 2 人工林土壤矿质元素的相关关系

Table 2 Correlation of soil mineral elements of man-made forests

指标 Index	Fe	Mn	Ti	Ca	Mg	Al	Mo	Ni	Co	Sr	Cu
Fe	1										
Mn	0.093	1									
Ti	0.841**	-0.069	1								
Ca	-0.852**	-0.428	-0.463	1							
Mg	0.059	-0.125	0.423	0.227	1						
Al	0.859**	-0.205	0.582*	-0.777**	0.005	1					
Mo	-0.400	-.667*	-0.402	0.470	-0.567	-0.187	1				
Ni	0.504	0.330	0.038	-0.802**	-.0164	0.683*	-0.432	1			
Co	0.485	0.292	0.203	-0.644*	0.080	0.566	-0.530	0.848**	1		
Sr	-0.953**	-0.193	-0.821**	0.833**	-0.267	-0.829**	0.620*	-0.580*	-0.592*	1	
Cu	-0.521	-0.151	-0.782**	0.235	-0.832**	-0.285	0.769**	-0.038	-0.284	0.680*	1
Zn	0.552	-0.503	0.713**	-0.131	0.010	0.414	0.302	-0.336	-0.342	-0.365	-0.227
Cd	-0.364	0.800**	-0.435	0.028	-0.387	-0.609*	-0.192	-0.066	-0.113	0.322	0.271
Cr	0.716**	0.132	0.650*	-0.603*	0.285	0.606*	-0.517	0.494	0.771**	-0.748**	-0.605*
Pb	0.802**	-0.359	0.661*	-0.576	-0.191	0.829**	0.136	0.314	0.305	-0.673*	-0.156
Na	-0.486	0.041	-0.144	0.558	0.815**	-0.484	-0.420	-0.296	-0.104	0.253	-0.450
As	0.436	-0.593*	0.548	-0.062	-0.139	0.388	0.479	-0.347	-0.419	-0.235	-0.032
Se	-0.081	-0.701*	-0.252	0.102	-0.327	0.346	0.657*	0.136	-0.035	0.154	0.511
B	-0.423	-0.466	-0.113	0.654*	0.096	-0.470	0.503	-0.701*	-0.547	0.562	0.168
S	0.194	0.653*	0.402	-0.127	0.123	-0.327	-0.470	-0.308	-0.166	-0.195	-0.434
Si	-0.266	0.401	-0.725**	-0.240	-0.784**	-0.097	0.207	0.464	0.164	0.315	0.768**
Cl	-0.161	-0.084	0.346	0.523	0.424	-0.490	-0.025	-0.774**	-0.391	0.157	-0.422

（续）

指标 Index	Zn	Cd	Cr	Pb	Na	As	Se	B	S	Si	Cl
Zn	1										
Cd	-0.524	1									
Cr	0.138	-0.357	1								
Pb	0.706*	-0.517	0.486	1							

Na	-0.440	-0.002	-0.112	-0.703*	1						
As	0.962**	-0.498	-0.023	0.710**	-0.523	1					
Se	0.141	-0.467	-0.241	0.417	-0.367	0.337	1				
B	0.274	-0.255	-0.217	-0.281	0.216	0.228	-0.111	1			
S	0.141	0.554	0.120	-0.170	0.077	-0.018	-0.838**	0.021	1		
Si	-0.568	0.529	-0.305	-0.224	-0.414	-0.428	0.194	-0.310	-0.251	1	
Cl	0.302	0.079	0.040	-0.129	0.367	0.201	-0.416	0.463	0.556	-0.699*	1

注: *表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关。

Notes: * indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 不同人工林土壤矿质元素特征

土壤肥力是土壤基本属性和本质特征的综合反映，能够为植物生长提供必需的营养元素（Gilliam & Dick, 2010），矿质元素是土壤肥力的重要组成部分，植物需要从土壤中摄取矿质元素并在体内积累。矿质元素是农作物生长发育、产量和品质形成的物质基础（宋少华等，2016），矿质元素含量的变化还会影响植物的繁殖能力（Brun et al, 2003），因而基于矿质元素的土壤肥力研究有助于评价产品质量形成的机理，合理指导可持续养分管理。喀斯特地区石漠化是重要的生态问题（Wang et al, 2002），导致土层浅薄且不连续、成土速率慢、水土流失严重（宋同清，2015），开展土壤矿质元素评价，能够为水、土资源高效利用提供参考依据。由于本文的矿质元素较多，因此选取与植物生长较为密切的几个元素进行讨论。

本文中，植物生长所必需的矿质元素锌以桉树林土壤含量最高（209.53 mg·kg^{-1}）、香椿林土壤含量最低（148.69 mg·kg^{-1}），表明桉树根系对锌的溶解与提取能力更强，这与桉树林凋落物蓄积量高、分解迅速、保水保肥能力强、水分蒸腾量大等有关；而香椿虽然为落叶乔木，但凋落物蓄存量少、适应喀斯特石漠化地区石质生境的能力强，这可能导致根系对元素的提取能力存在差异。从人工林的分布环境来看，桉树林较香椿林具有更高的土层厚度（前者大于 20 cm，后者主要利用裂隙土）和较低的岩石裸露率（分别为 10%、25%），这亦会影响矿质元素的空间分布，表明开展喀斯特地区人工林地土壤保持具有调蓄养分的功能。

硼是植物生长发育必需的微量营养元素，在花器官形成、增加花粉数量、促进授粉受精等方面都发挥着重要作用，能够促进植物生长发育和品质形成。在 6 种典型成熟人工林中，硼元素含量由大到小依次为枇杷林（58.68 mg.kg^{-1}）、桉树林（56.33 mg·kg^{-1}）、核桃林（50.83 mg·kg^{-1}）、栾树林（49.75 mg·kg^{-1}）、柏木林（34.52 mg·kg^{-1}）、香椿林（31.68 mg·kg^{-1}），不同人工林土壤之间表现出差异性。该区域内枇杷品质较佳，研究结果也表明其土壤微量元素含量更丰富，这也可以在一定程度上揭示枇杷品质形成的机理；香椿虽然是该区域的适生乔木树种，但根系的范围小、须根数量少，根系活性可能相对较低，主要以缓慢投入物质积累的策略来适应喀斯特石漠化特殊生境。

钼的营养作用突出表现在氮素代谢方面，是硝酸还原酶和固氮酶的成分，还参与根瘤菌的固氮作用，在促进繁殖器官的建成中发挥着特殊功能（陆景陵，2003）。不同人工林土壤的钼元素含量除香椿林和栾树林差异不显著外，其他林分之间呈现显著差异，以桉树林最高、栾树林最低。本文结果表明，桉树林有更丰富的钼元素资源参与氮素固定作用，对钼元素的需求量也可能更大，原因是桉树水分蒸腾速率高，导致养分周转速率也较快；此外，桉树林多分布在海拔 1 200 m 左右的区域，水热条件好，气态水资源较为充足，导致桉树林生长旺盛，因而需要更多的养分维持生长和元素计量平衡。

氯是植物细胞胞质和液泡中的主要矿质阴离子，土壤中氯元素亏缺使生长受到限制，含量过高则对植物生长造成毒害作用，较多植物都有忌氯的特征。本研究中，土壤氯元素含

量为栾树林土壤最高（0.34 mg·kg^{-1}）、香椿林土壤最低（0.15 mg·kg^{-1}），氯元素含量大小可能与植物的抗性水平有关；同时，由于栾树林下种植有花椒（*Zanthoxylum planispimum var. dintanensis*）、红薯（*Ipomoea batatas*）、玉米（*Zea mays*）和蔬菜等农作物，受到更多的农艺措施干扰，尤其是尿素、氯化钾肥的施用等，这也可能是影响氯元素含量的原因之一。

喀斯特生境具有高钙的特征，土壤钙元素以枇杷林（90.95 mg·kg^{-1}）最高、桉树林（7.06mg·kg^{-1}）最低。原因是枇杷是退耕还林树种，桉树是封山育林树种，二者所处生境的胁迫程度各异，环境背景值不同；也与不同树种对钙的适应性和吸收、转化能力存在差异有关。由于桉树林是自然生长为主，枇杷林受人工施肥、翻耕、采摘等干扰较大，导致钙含量呈现显著差异，表明喀斯特地区虽然地质环境富钙，但并不代表土壤中钙含量丰富，这对该区人工林养分管理提供了理论参考。由前述分析可见，黔中喀斯特山区人工林养分管理应做到定量、精准，这对林分健康经营具有重要的实践价值。

但是，由于目前对土壤矿质元素的研究集中在氮、磷、钾等大量元素，中量、微量矿质元素的研究报道相对较少，且缺乏统一的质量评价标准体系，因而难以评定各矿质元素的数量丰缺状况，也未将本研究区与其他区域的研究结果进行综合比较。同时，元素之间存在协同、拮抗等联合作用方式，不同浓度的元素组合必将产生不同的效应（王焕校，2012），这也是未来土壤矿质元素和植物营养研究中需要重点关注的科学问题。

3.2 矿质元素之间的相关性

本文的研究结果表明典型人工林土壤矿质元素之间表现出一定的相关关系，说明不同元素之间存在协同或权衡关系，通过综合调控措施对植物发挥作用。铁与钙、铝、锶、铬、铅等元素的相关性较高，且多表现为促进效应，而锰与其他元素之间更多表现为抑制效应，说明元素之间的作用规律存在差异，这可能与土壤中铁的丰度较高有关，铁元素可以促进其他元素的释放，表明了土壤中全铁含量的重要性。钙、镁元素也与其他元素表现出较强的相关性，钙与铁、铝、镍、钴、锶、铬、硼等表现出较高的相关性，镁与铜、钠、硅表现出显著的相关关系，表明矿质元素之间存在此消彼长的特征。其中，钙与铁、锶、硅之间呈极显著正相关关系，可能原因是硅酸盐矿物风化导致其同步活化；镁与铜、硅之间均表现出极显著的负相关关系，表明喀斯特地区较高的镁含量会抑制铜、硅等元素的活化。矿质元素是植物生长所必需的元素，具有重要的生理、生态功能，但这些元素发挥生理作用的前提是处于相对平衡与稳定状态，下一步基于生态化学计量学研究元素平衡关系的维持具有重要价值（Jeyasingh et al, 2009; Elser et al, 2010），能够为元素的营养功能调控提供理论和实践依据。

4 结论

研究表明不同人工林土壤矿质元素含量存在较大差异，不同矿质元素随林分类型的变化规律不一致，表明植物根系对养分的提取和富集能力存在差别；元素之间表现出一定程度的相关性，存在此消彼长的关系，尤其以铁、钙等元素与其他元素的关系更为密切，说明土壤矿质元素之间存在增强或抑制效应；矿质元素之间的互作效应及其计量平衡关系是未来研究的科学问题之一。

参考文献

ABER JD, MAGILL A, MCNUITY SG, et al, 1995. Forest biogeochemistry and primary production aitered by nitrogen saturation [J]. Water Air Soil poll, 85(3):1665-1670.

BRUN LA, LE CORFF J, MAILLET J, 2003. Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species[J]. Environ Pollut, 122(3):361-368.

CAO YQ, YAO XH, REN HD, et al, 2015. Changes in contents of endogenous hormones and main mineral elemental in oil-tea camellia fruit during maturation [J]. J Beijing For Univ, 37(11):1106-1110. [曹永庆，姚小

华, 任华东, 等, 2015. 油茶果实成熟过程中内源激素和矿质元素含量的变化特征[J]. 北京林业大学学报, 37(11): 76-81.]

DENG SH, ZENG LT, GUAN Q, et al, 2016. Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in South China [J]. Acta Pedol Sin, 53(5):1326-1333.[邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等, 2016. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报, 53(5): 1326-1333.]

ELSER JJ, STERNER RW, GOROKHOVA E, et al, 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecol Lett 3: 540-550.

GILLIAM FS, DICK DA, 2010. Spatial heterogeneity of soil nutrients and plant species in herb-dominated communities of contrasting land use[J]. Plant Ecol, 209(1): 83-94.

GOVAERTS B,SAYRE KD, DECKERS J, 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico[J]. Soil Till Res, 87(2):163-174.

HUANG YH, ZHANG WQ, GAN XH, et al, 2017. Soil quality assessment on different tree species composition patterns in *Cunninghamia lanceolata* stand conversion in south subtropics [J]. Sci Soil Water Conserv, 15(3): 123-130. [黄钰辉, 张卫强, 甘先华, 等, 2017. 南亚热带杉木林改造不同树种配置模式的土壤质量评价[J]. 中国水土保持科学, 15(3): 123-130.]

JEYASINGH PD, WEIDER LJ, STENER RW, 2009. Genetically-based trade-offs in response to stoichiometric food quality influence competition in a keystone aquatic herbivore[J]. Ecol Lett, 12(11):1229-1237.

JOIMEL S, CORTET J, JOLIVET CC, et al, 2016. Physico-chenical characteristics of topsoil for constrasted forest, agricultural, urban and industeral land uses in France [J]. Sci Total Envir, 545-546: 40-47.

LI WQ, ZHANG Y, SHI J, et al, 2016. Effects of silicon on mineral element uptake and distribution, yield and quality of Chinese spring onion [J]. J plant Nutr and Fert, 22(2): 486-494. [李炜蔷, 张逸, 石健, 等, 2016. 硅对大葱矿质元素吸收、分配特性及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 22(2): 486-494.]

LIU L, XU MK, WANG SL, et al, 2013. Effects of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure [J]. Acta Ecol Sin, 33(15): 4692-4706. [刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等, 2013. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J]. 生态学报, 33(15): 4692-4706.]

LU J L, 2003. Plant Nutrition (Second Edition)[M]. Beijing: China Agr Univ Press. [陆景陵, 2003. 植物营养学(第 2 版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社.]

MAO QG, LU XK, CHENG H, et al, 2015. Responses of terrestrial plant diversity to elevated mineral element inputs [J]. Acta Ecol Sin, 35(17):5884-5897. [毛庆功, 鲁显楷, 陈浩, 等, 2015. 陆地生态系统植物多样性对矿质元素输入的响应[J]. 生态学报, 35(17): 5884-5897.]

QIN J, SHI AL, MOU BQ, et al, 2017. Genetic diversity and association mapping of mineral element concentrations in spinach leaves [J]. BMC Genom, 18:941-954.

SONG SH, LIU Q, LI M, et al, 2016. Correlation and path analysis between mineral elements and quality parameters in ono-astringent persimmon [J]. J Fruit Sci, 33(2): 202-209. [宋少华, 刘勤, 李曼, 等, 2016. 甜柿果实矿质元素与品质指标的相关性及通径分析[J]. 果树学报, 33(2): 202-209.]

SONG TQ, 2015. Piants and the environment in karst areas of southwest China [M]. Beijing: SCI Press. [宋同清, 2015. 西南喀斯特植物与环境[M]. 北京: 科学出版社.]

WANG F, LI QH, LIN C, et al, 2015. Establishing a minimum data set of soil quality assesment for cold-waterlogged paddy field in Fujian Province, China [J]. Chin J Appl Ecol, 26(5):1461-1468. [王飞, 李清华, 林诚, 等, 2015.福建冷浸田土壤质量评价因子的最小数据集[J]. 应用生态学报, 26(5):1461- 1468.]

WANG HJ, 2012. Pollution Ecology (Third Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press. [王焕校. 污染生态学（第 3 版）[M]. 北京: 高等教育出版社.]

WANG LX, CHEN H, GUO F, et al, 2013. Effects of cadmium on peanut growth and mineral nutrient uptake [J]. J Agro-Environ Sci, 32(6): 1106-1110. [王丽香, 陈虎, 郭峰, 等, 2013. 镉胁迫对花生生长和矿质元素吸收的

影响[J]. 农业环境科学学报, 32(6): 1106-1110.]

WANG SJ, ZHANG DF, LI RL, 2002. Mechanism of rocky desertification in the karst mountain areas of Guizhou Province, southwest China [J]. International Review for Environmental Strategies, 3(1): 123-135.

WEI J, JIANG Y, LIN CX, et al, 2018. Correlation and path analysis between fruit quality and mineral elements of 6 varieties of Korla fragrant pear [J]. Food Sci, DOI:10.14067/j.cnki.1003-8981.2013.03.012. [位杰，蒋媛，林彩霞，等, 2018. 6 个库尔勒香梨品质果实矿质元素与品质的相关性和通径分析[J]. 食品科学, DOI:10.14067/j.cnki.1003-8981.2013.03.012.]

WHYTEMARE AB, EDMONDS RL, ABER JD, et al, 1997. Influence of excess nitrogen deposition on a white spruce (*Picea glauca*) stand in southern Alaska [J]. Biogeochemistry, 38(2): 173-187.

ZHANG L, WEN SL, CAI ZJ, et al, 2014. Characteristics of soil fertility under different vegetation types in the hilly red soil region of southern Hunan[J]. Acta Ecol Sin, 34(14): 3996-4005. [张璐，文石林，蔡泽江，等, 2014. 湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征[J]. 生态学报, 34(14): 3996-4005.]